

1. INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest escrit és reivindicar el formigó de calç com un material més dels que tenim al nostre abast, que entronca perfectament amb la tradició constructiva mediterrània, i dona resposta a les exigències de compatibilitat en obres de restauració, així com a les actuals consideracions respecte a la sostenibilitat.

La calç és un material tradicional (figura 1). L'argamassa a base de calç i altres materials s'ha fet servir amb excel·lents resultats des de «sempre» en la nostra cultura i geografia. I també es pot fer servir en la construcció actual, amb excel·lents resultats, tenint en compte diverses consideracions i precaucions. Reivindiquem, per tant, la calç davant l'hegemònica imposició del ciment, que també és un excel·lent material, però que en el món de la restauració comporta alguns problemes vinculats a l'aparició de sals, incompatibilitats entre els mòduls de deformació de les estructures tradicionals i les de formigó de ciment pòrtland (CP), formació de compostos expansius, etc.

2. DE LA CALÇ AL CIMENT: ELS CONCEPTES DE PUTZOLANITAT I HIDRAULICITAT

Tradicionalment s'ha treballat amb calçs aèries, obtingudes a partir de la cocció de pedres molt pures de carbonat càlcic. El saber popular i la bibliografia històrica (Vitruvi Pol·lió, 1787) ja fan referència a la bondat d'aquestes calçs i també ens avisen que, quan volem obtenir productes més impermeables o més resistents, cal barrejar aquesta calç aèria amb addicions de tipus putzolanes naturals o picadís, que no és més que ceràmica cuita a baixa temperatura, feta pols (en castellà, *chamota*; en italià, *cocciopesto*) (figura 2).

Si analitzem aquest saber popular des de la química, veiem que l'objectiu és aconseguir un silicat càlcic

o un aluminat càlcic i, per tant, cal afegir sílice (SiO_2) o alúmina (Al_2O_3) reactives a la calç, i això és el que aporten tots aquests materials de tipus putzolànic. Aquesta capacitat de reaccionar amb la calç (i d'altres alcalins) s'anomena *putzolanitat*.

Si es fabrica la calç a partir de la cocció de pedres menys pures, amb majors continguts d'argiles, margues, etc., s'obtenen calçs en les quals ja hi ha una part en què els silicats càlcics (i els aluminats càlcics) es formen en la mateixa cocció. Per tant, en aquesta part, sols caldrà l'aigua per a formar compostos resistents del tipus silicats càlcics hidratats (tobermorites). La capacitat de formar aquesta reacció d'hidratació és anomenada *hidraulicitat*. La resta del material, aquell que no conté compostos provinents de les argiles, reaccionarà àerament amb el CO_2 .

Segons la proporció entre aquests dos tipus de materials (els aeris i els hidràulics), podem identificar o diferenciar les diferents calçs i ciments. La calç, la calç hidràulica, el ciment natural o els ciments pòrtland no són materials tan diferents, ja que tots ells tenen una base comuna: la calç o el calci.

En la figura 3 podem veure un esquema d'aquesta classificació. Horitzontalment trobem la seqüència dels diferents conglomerants en funció del seu contingut en argiles. La calç aèria (sense argiles) és un material que s'endureix amb l'aire (CO_2) i, a mesura que anem cap a la dreta, s'identifiquen materials més hidràulics; la calç hidràulica (una calç amb uns components aeris i uns d'hidràulics), el ciment natural (que és una calç portada al límit i que, fins i tot, en alguns moments fou anomenada *calç límit* o *ciment límit*) i, finalment, quan la química està prou desenvolupada, el ciment pòrtland (que és el pas següent, amb continguts màxims de sílice i alúmina).

En l'eix vertical veiem la capacitat d'aportar sílices i alúmines amb altres materials: les putzolanes i el picadís en la calç aèria, i ja modernament, en el ciment;

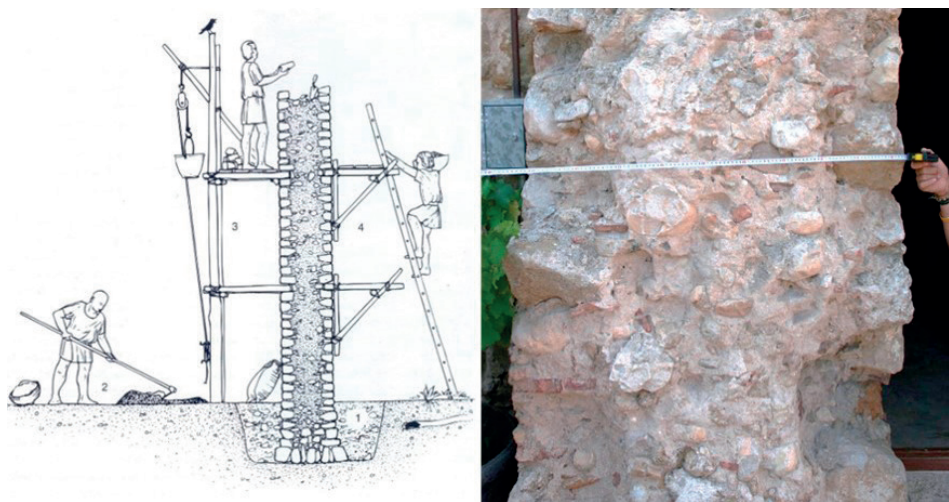


FIGURA 1. El formigó de calç és un vell material de construcció. A l'esquerra, il·lustració explicativa de la construcció d'un mur romà (Adam, 1996). A la dreta, fotografia d'un contrafort trencat d'una masia de l'Empordà (fotografia dels autors).



FIGURA 2. Detall d'una junta de morter de calç amb picadís en una fàbrica de maó de l'Alhambra de Granada (fotografia dels autors).

també les escòries siderúrgiques, el fum de sílice, les cendres volants, etc.

3. ELS FORMIGONS DE CALÇ EN L'ACTUALITAT

Després d'anys en què el ciment s'havia imposat de manera rotunda en el món de la construcció, darrerament, i per motius diversos, observem que hi ha un cert clima de reivindicació de l'ús de la calç. Les experiències que es presenten a continuació donen respostes a projectes diversos i se sumen a aquesta aposta per un material tradicional, amb moltes virtuts, però que requereix també conèixer-lo.

Avui dia qualsevol professional té uns coneixements extensos sobre el formigó de CP (o, si més no, sap on pot anar a cercar la informació). Hi ha una extensa bibliografia, normativa, reglaments, una potent indústria dels additius i una tecnologia suficient per a fer formigons de característiques especials, entre d'al-

tres. Potser seria interessant plantejar-nos amb els formigons de calç la mateixa exigència metodològica per a obtenir els mateixos bons resultats.

El formigó és un material conformable, resistent, volumètric i en el qual podem incorporar armadures allà on pertoqui perquè absorbeixin les tensions justament en el lloc on convingui. Així doncs, el formigó és un excel·lent material de construcció.

Si utilitzem formigons de calç, en comptes de formigons de CP, evitem a més alguns problemes: els derivats de l'excessiva rigidesa que proporciona el ciment, l'aparició de sals o els problemes que ocasiona en alguns morters la impermeabilitat. Però no podem substituir de manera automàtica el ciment per la calç, perquè entre ambdós materials hi ha aspectes que cal controlar.

El primer aspecte és l'aigua de pastat. Si volem obtenir resistències rellevants amb formigons de calç hem d'aconseguir reduir l'aigua de pastat. És ben sabut que la calç és un producte molt fi, de molta superfície específica, i que demana molta aigua per a poder aconseguir consistències adequades a l'hora de treballar-lo. Habitualment aquesta treballabilitat s'aconsegueix a força d'afegir-hi aigua. Però una alta relació aigua/conglomerant penalitza molt la resistència i, per tant, hem de buscar additius que ens permetin rebaixar aquesta relació (reductors d'aigua). Tradicionalment, aquesta funció la feien determinades substàncies naturals (clara d'ou, sang, etc.) i avui en dia ja existeixen alguns bons additius reductors d'aigua que actuen correctament amb conglomerants de calç.

Paral·lelament, si reduïm l'aigua disminuïm la retracció, un problema més important en la calç que en el ciment. Si no volem fissures per retraccions podem establir diferents estratègies que tenen a veure amb la granulometria, els additius que modifiquen la tensió superficial en la xarxa de porus i/o les addicions que compensen la pèrdua de volum. Però una acció senzi-

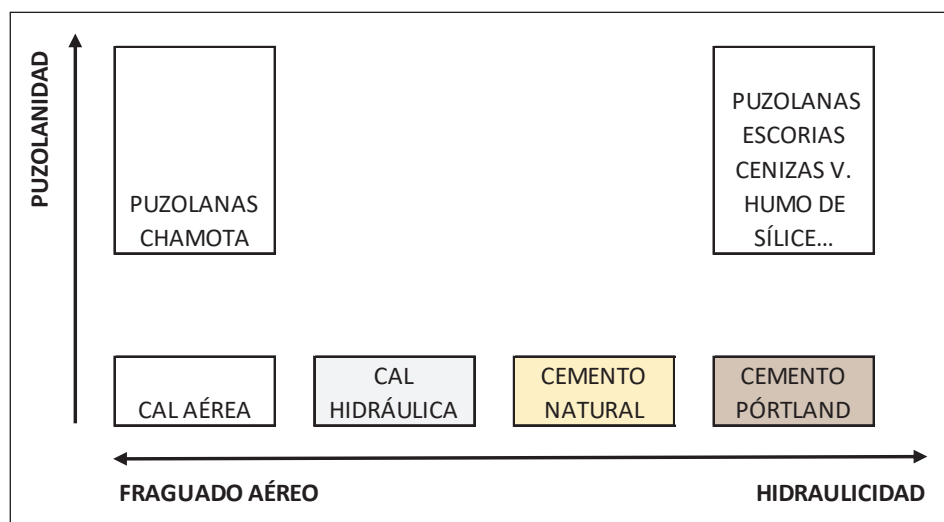


FIGURA 3. Esquema descriptiu dels diferents conglomerants amb base calç (Rosell, 2007).

| DESIGNACIÓN | No CaCO ₃ | TIPO DE «IMPUREZAS» | FRAGUADO/ENDURECIMIENTO |
|------------------------------|----------------------|---|-------------------------------------|
| Cal común, Cal grasa | < 6 % | Sílice, alúmina... | No endurece sumergida |
| Cal árida, Cal magra | | Sílice (arena), hierro, magnesio, manganeso | No endurece sumergida |
| Cal dolomítica | | Magnesio | No endurece sumergida |
| Cal medianamente hidráulica | 8 a 12 % | Arcillas, Mg, Mn, Fe | Fraguado sumergido: 15 a 20 días |
| Cal hidráulica | 13 a 17 % | Arcillas, Mg, Mn, Fe (Sílice preponderante) | Fraguado sumergido: 6 a 8 días |
| Cal eminentemente hidráulica | 18 a 20 % | Arcillas, Mg, Mn, Fe (Sílice preponderante) | Fraguado sumergido: 2 a 4 días |
| Cal límite | 20 a 25 % | Arcilla | «con prontitud» |
| Cemento límite inferior | 25 a 27 % | Arcilla | Fraguado sumergido: 15 a 20 minutos |
| Cemento medio | 28 a 36 % | Arcilla | «mucha prontitud» |
| Cemento límite superior | 37 a 65 % | Arcilla | |

FIGURA 4. Transcripció en forma de taula de l'explicació de com eren els diferents conglomerants el 1859 (Espinoza, 1859). Com es pot veure, la classificació segueix un ordre creixent segons el contingut d'argila de la matèria primera.

lla i eficaç és, evidentment, reduir l'aigua de pastat, que a més comporta una reducció de la porositat, una característica interessant de cara a la durabilitat.

Amb tot, també hauríem de curar el formigó de manera adequada i que no és la mateixa que fem servir per al formigó de CP. Si un formigó de ciment portland el curem a base de regar-lo o d'impedir que l'aigua marxi, en un formigó de calç hi ha una part de reacció hidràulica que requereix aigua, mentre que hi ha una altra part de reacció aèria que necessita CO₂ de l'aire. Si la porositat està plena d'aigua, el CO₂ no arriba a l'interior del formigó; per tant, la manera de curar un formigó de calç és regar-lo sovint, i poc, perquè es mulli i s'assequi, es mulli i s'assequi.

El segon aspecte és l'evolució de la resistència. En els formigons de calç s'assoleixen les resistències més lentament que amb els formigons de portland. Cal, per tant, desencofrar bastants dies més tard, el que implica organitzar l'obra de manera diferent. I en paral·lel, el mòdul de Young, que creix a mesura que puja la resistència, també augmenta més lentament en un formigó de calç que en un de CP (figura 5).

El tercer aspecte és la reserva alcalina. Coneixem com a reserva alcalina el contingut de material present en la matriu del formigó, amb capacitat de dissoldre's en aigua i d'augmentar molt significativament el pH d'aquesta. En el CP la reserva alcalina és la portlandita, és a dir, la calç que es genera en la presa del mateix ciment.

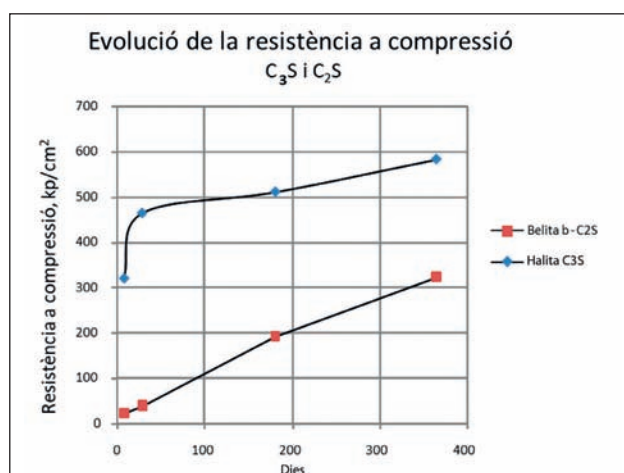
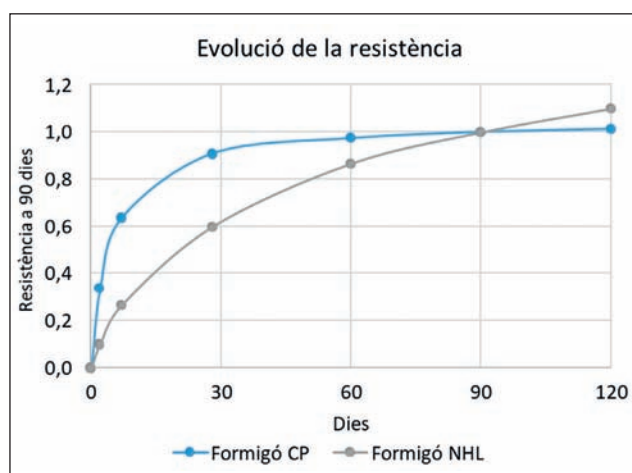


FIGURA 5. Evolució de la resistència. A l'esquerra, si considerem la resistència a compressió als noranta dies com el 100 %, podem comparar el pendent de les corbes com la velocitat d'incrementar la resistència. A la dreta, les corbes de creixement de resistència i els valors absoluts de l'halita (component protagonista dels ciments) i de la belita (component coprotagonista de les calçs hidràuliques) (gràfics elaborats pels autors).

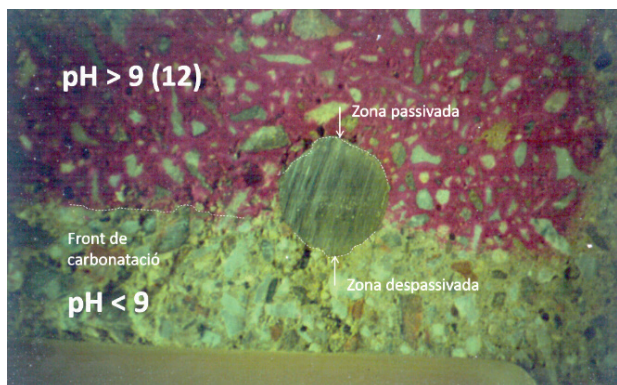


FIGURA 6. Mitjançant la fenolftaleïna s'observa visualment el canvi de color de la matriu del formigó en funció del seu pH. En la zona de pH elevat, l'armadura es troba passivada i no es pot donar corrosió per presència d'humitat (fotomuntatge de J. R. Rosell).

Podríem pensar que el formigó de calç, com que és de calç, té per si sol molta reserva alcalina, i certament és així a l'inici. Però amb el pas del temps i el CO_2 , la calç es va carbonatant, i esdevé carbonat càlcic, el qual ja no és soluble i, per tant, ja no modifica el pH de l'aigua que pugui aparèixer exteriorment.

Aquesta reacció de carbonatació avança de l'exterior a l'interior a una velocitat que depèn fortament de la porositat del material. El formigó de calç és necessàriament més porós perquè l'hem de dosificar amb molta més aigua que la que consumirà en reaccions d'hidratació. Aquesta aigua és la que acabarà evaporant-se i deixarà darrere seu molta xarxa porosa. En conseqüència, la velocitat de carbonatació del formigó de calç és tan elevada que consumeix la reserva alcalina en molt poc temps, i no tenir prou reserva alcalina pro-

voca la ràpida desprotecció química de l'armadura convencional enfront de la corrosió. Per tant, si utilitzem les armadures habituals en formigons de calç, tindrem problemes (figura 6).

4. ALGUNES EXPERIÈNCIES

La nostra experiència en formigons i morters de calç va començar al laboratori amb estudis aplicats dels efectes del picadís en formigons de calç (Bestue, Corbella i Rosell, 2010) i amb conglomerats confeccionats amb calç hidràulica versus barreges de calç i ciment (Peñaranda i Rosell, 2012).

La primera intervenció en obra i d'una certa importància va ser la construcció d'una volta de canó, de 4,5 m de llum, a partir d'un projecte d'Oriol Rosselló, arquitecte. Es tractava de dissenyar un formigó en massa on l'exigència de resistència no era gaire elevada. Es va optar per fer un formigó a partir d'un morter de calç comercialitzat, i se'n corregí la corba granulomètrica afegint-hi un percentatge d'àrid gruixut. El producte funcionava prou bé, però el cost resultava molt elevat en tant que s'utilitzava un morter comercialitzat per a gruixos petits, d'una manera molt massiva (figura 7).

A partir d'aquesta experiència vam començar a plantejar-nos els formigons de calç amb armadures, el que comportava definir els valors de diferents paràmetres. En el cas dels formigons de ciment portland i armadures convencionals d'acer corrugat, aquests paràmetres són prou coneguts i estan carregats per defecte en les bases de dades dels programes de càlcul. Ens referim al mòdul de Young del material, les resistèn-



FIGURA 7. Dues fotografies d'Oriol Rosselló que mostren el procés de formigonar per tongades i els connectors de pedra, de la volta.

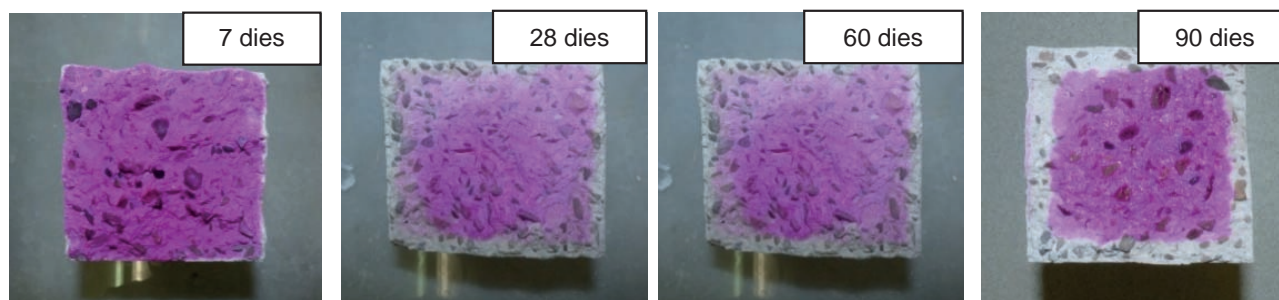


FIGURA 8. Evolució de la fondària de carbonatació de formigó de calç hidràulica en una proveta de 15 × 15 cm (Rosell, De la Rosa i Ramírez-Casas, 2016).

cies característiques assolibles, les consideracions d'adherència entre el formigó i l'element d'armat per a determinar les longituds de transferència, les corbes de creixement de la resistència en funció del temps, els temps d'espera per a desapuntalar i desencofrar, etc.

Vam iniciar, per tant, una recerca encaminada a conèixer l'adherència entre el formigó i les armadures d'acer inoxidable o les armadures de fibra de vidre (Rosell, De la Rosa i Ramírez-Casas, 2016). Dels resultats obtinguts es desprèn que les barres de fibra de vidre s'adhereixen als formigons de calç tant com les d'acer corrugat i, tot plegat, amb uns valors equivalents als obtinguts amb formigons de CP de resistències similars. Això sí, amb velocitats de carbonatació molt més elevades (figura 8).

L'estudi es va realitzar pensant en el projecte de l'arquitecta Mercè Zazurca per a la rehabilitació de la Casa Puig i Cadafalch, a Argentona, i concretament intentant de donar solució al reforç dels merlets que recorrien les

façanes. Es tractava de dissenyar un reforç de formigó, en forma de L prou rígid, amb connectors amb la fàbrica, per a resoldre els problemes d'inestabilitat al vent dels mateixos merlets; alhora, també millorava el comportament estructural general de l'edifici, ja que dotava tot el conjunt d'un cercol perimetral de coronament de les estructures de parets de càrrega (figura 9).

En aquest cas, el formigó es va fer novament a partir d'un morter comercial amb la correcció de granulometria, feta a l'obra, mitjançant l'aportació d'una graveta; i els armats van ser de malla de fibra de vidre. Tot plegat, una solució de cost elevat.

Un altre cas ha estat el del formigó per al baluard de la muralla de Barcelona, descoberta sota el mercat de Sant Antoni, en el marc del gran projecte de rehabilitació dels arquitectes Pere Joan Ravetllat i Carme Ribas. En aquest cas, la geometria de l'element era molt potent, tot i que no hi havia cap compromís remarcable d'exigència de resistència. El baluard s'ha realitzat for-



FIGURA 9. Detalls del reforç dels merlets i encercolat perimetral de la Casa Puig i Cadafalch, a Argentona. A l'esquerra, connectors i armadura de fibra de vidre. A la dreta, elements ja formigonats (fotografies dels autors).



FIGURA 10. Procés seguit per formigonar el baluard de la muralla medieval de Barcelona, sota el mercat de Sant Antoni.

migonant en dues etapes verticals i utilitzant un formigó ciclopi de calç per al reblert (figura 10).

El més remarcable d'aquest formigó amb calç hidràulica NHL-5 de la marca Tigre és que s'ha realitzat en una central formigonera, amb les especificitats que això va comportar. I si bé és cert que ha proporcionat resistències reduïdes, aquestes són suficients per a la funció que ha de dur a terme. Tampoc s'ha utilitzat cap reductor d'aigua.

Val a dir que també es poden dissenyar *grouds* (pastes de calç amb putzolanes, per injectar) d'altres prestacions mecàniques. En aquests casos, cal ajustar molt el tema de la dosificació i els additius, i es van poder assolir valors entre 32 i 43 MPa de compressió, que són resistències molt elevades aconseguïdes amb calç (Ramírez-Casas, Puchol i Rosell, 2014).

Com a darrera experiència tenim la restauració de l'església del Rosselló (figura 11), de Miquel Àngel Sala, arquitecte, on es proposa fer la reconstrucció del parament i l'arrencada del campanar, repetint parcialment la volumetria que tenia el conjunt abans de l'esfondrament parcial ocorregut el gener del 2016. Aquesta intervenció es vol fer amb un material diferent de l'inicial, però amb les garanties de compatibilitat entre materials i amb un aspecte determinat, per la qual cosa s'ha pensat en un formigó de calç.

Aquest encàrrec ens ha arribat amb prou temps per a poder desenvolupar el formigó de calç al laboratori, a partir d'una campanya experimental prèvia. I això és una consideració que cal tenir en compte: si volem saber resultats de resistència d'un formigó a seixanta dies, cal preveure i iniciar els estudis amb prou antelació.

El formigó proposat ha estat un formigó en massa, ciclopi, encofrat a dues cares i amb unes tongades de formigó que coincideixen amb unes petites impostes en façana fetes amb rajols ceràmics. El formigó es fa en obra i en força pastades relativament petites, atesa la lentitud necessària de l'obra.

El requeriment inicial era de 10 MPa a 90 dies, que, tot i no ser un valor elevat, tampoc no és fàcil d'assolir. Es van preparar al laboratori diferents dosificacions

partint dels materials previsiblement utilitzables de la zona on es troba l'obra. Alguns dels formigons dissenyats han proporcionat, al laboratori, resistències superiors a 35 MPa a 60 dies, afegint-hi addicions putzolàniques i amb un control de l'aigua molt exigent. De les quatre dosificacions estudiades, finalment es va triar la A1 (figura 12), que ens proporcionava, al laboratori, els 10 MPa a 28 dies, sense massa complicacions en la dosificació.

I en aquesta experiència vam detectar una realitat: la producció del formigó de calç, en obra, requereix per part dels operaris un coneixement precís. Tot i haver indicat als operaris la manera de fer el formigó, les provetes realitzades del primer formigó fet *in situ* (*in situ* 0, segons la taula de la figura 12) van donar unes resistències de 2,3 MPa a 28 dies i 3,7 MPa a 60 dies, preocupantment per sota del que s'esperava.



FIGURA 11. Església de Sant Pere, a Rosselló (Segrià) després de l'ensorrament de la torre del campanar i les parts inferiors (fotografia del diari *El Punt Avui*).

| Resistència a compressió Mpa | | | | | |
|------------------------------|-----|------|------|------|------|
| edat (en dies) | | | | | |
| | 7 | 28 | 60 | 90 | 120 |
| A1 | | 10,3 | | 14,1 | |
| A3 | | 9,2 | 11,2 | 14,5 | 14,5 |
| B1 | | | 35,4 | | 39,1 |
| B2 | | 12,3 | 15,8 | | |
| <i>in situ</i> 0 | | 2,3 | 3,7 | | |
| <i>in situ</i> 1 | 4,5 | 10 | | | |
| <i>in situ</i> 2 | 4,3 | 9,2 | | | |

altre add. + aigua
amb add.
amb add.

FIGURA 12. Resultats (MPa) de resistències a compressió dels formigons de calç preparats per a l'església de Rosselló.

Efectivament, les dosificacions en obra es fan a galledes, cabassos i carretons; si no tenim l'additiu que ens han prescrit, utilitzem «el de sempre» que tants bons resultats proporciona; i si, amb tot, el formigó no «funciona prou bé» (que podríem interpretar com que no és prou fluid), s'hi afegeix una mica d'aigua.

A l'obra no hi ha cap dosificador mecànic. Els operaris, fins i tot aquells que tenen molt d'ofici, desconeixen els formigons de calç i la mateixa calç. Per tant, d'una banda, s'ha de transmetre la cura necessària per a realitzar aquests tipus de materials i, de l'altra, ajustar les prescripcions tècniques que venen de laboratori a les distintes realitats de les obres. Només així es podran aconseguir bons resultats, com els obtinguts finalment amb les mostres *in situ* 1 i 2 (figura 12).

5. CONCLUSIONS

Els formigons de calç són perfectament compatibles amb intervencions estructurals en obres de restauració (i no només en aquest tipus d'obres).

Les calçs hidràuliques ens permeten confeccionar aquests materials sense cap aportació de ciment portland, però la «cultura» del formigó (que, per defecte, sempre considerem formigó de ciment portland) no es pot traslladar mimèticament als formigons de calç.

Cal ser especialment curosos en diversos aspectes:

- Utilitzar reductors d'aigua.
- Fer servir armadures no corrosibles (fibres sintètiques, fibres vegetals, acers galvanitzats, etc.).
- Respectar els temps d'enduriment i d'adquisició de resistència.
- Assumir que cal treballar amb resistències «baixes» (fins a 15 MPa) a noranta dies.
- Saber traslladar la «manera de fer» aquests formigons a l'obra.

6. BIBLIOGRAFIA

- ADAM, J. P. (1996). *La construcción romana: Materiales y técnicas*. Lleó: Editorial de los Oficios.
- BEDINI, S.; ROSELL, J. R. (2017). *Estudio de microhormigón de cal con sustitución de árido cerámico reciclado*. Tesina de màster. Barcelona: UPC.
- BESTUE, J.; CORBELLÀ, X.; ROSELL, J. R. (2010). *Diseño y determinación de propiedades de un hormigón romano*. Projecte de final de grau. Barcelona: UPC.
- ESPINOSA, P. C. (1859). *Manual de construcciones de albañilería*. Madrid: Imprenta Severiano Baz. [Edició facsímil de 1991]
- LUCAS, P. de; ROSELL, J. R.; PIALARISSI, S. H. (2017). *Estudio del hormigón de cal con fibras de polipropileno*. Tesina de màster. Barcelona: UPC.
- PEÑARANDA, P.; ROSELL, J. R. (2012). *Diferencias y similitudes entre morteros de cal hidráulica y morteros mixtos de cal aérea y cemento portland*. Projecte de final de grau. Barcelona: UPC.
- RAMÍREZ-CASAS, J.; PUCHOL, R.; ROSELL, J. R. (2014). *Inyecciones puzolánicas de altas prestaciones*. Projecte de final de grau. Barcelona: UPC.
- ROSELL, J. R. (2007). *Morteros de cal para obras de restauración*. Conferència a Construmat Barcelona 2007.
- (2013). *Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal: tamaño y formas de las partículas*. Tesi doctoral. Barcelona: UPC.
- ROSELL, J. R.; ROSA, G. de la; RAMÍREZ-CASAS, J. (2016). «Hormigones de cal: adherencia a las armaduras». Ponència al congrés V Jornadas FICAL - Fórum Ibérico da Cal: «A cal no espaço ibérico: um futuro com história» (Lisboa, 2016).
- VITRUVI POLLIÓ, M. (1787). *Los diez libros de arquitectura*. Traducció de José Ortiz. Madrid: Imprenta Real.